



Ciclos Orgânicos de Rankine



Ciclos
Orgânicos
de Rankine

DEZEMBRO 2011

Ciclos Orgânicos de Rankine

ÍNDICE

1. Introdução	PÁG. 1
2. Vantagens dos Ciclos Orgânicos de Rankine	4
3. Descrição da tecnologia	5
4. Fluidos orgânicos utilizados em COR	6
5. Equipamento de expansão	10
6. Recuperação de calor em motores de combustão interna	11
7. Aspectos económicos da recuperação de calor com COR - Ciclos Orgânicos de Rankine	14
8. Exemplos de aplicação de tecnologia com base em Ciclos Orgânicos de Rankine (COR)	16
8.1. Geotermia	16
8.2. Biomassa	18
8.3. Efluentes térmicos industriais	19
8.4. Gás de Aterro Sanitário	20
9. Referências	21

1. INTRODUÇÃO

A conversão de energia térmica em energia elétrica ou mecânica com recurso à utilização de turbinas de vapor processa-se segundo o designado ciclo de Rankine (CR). De acordo com este ciclo termodinâmico a produção de vapor realiza-se numa caldeira que poderá queimar um combustível (e.g. carvão, gás natural, etc.) ou então recuperar calor de um processo industrial ou aproveitar o calor contido nos gases de escape de uma turbina de gás tal como acontece nas designadas centrais de ciclo combinado.

O vapor a alta pressão e temperatura (normalmente sobreaquecido) é expandido numa turbina de vapor produzindo trabalho mecânico que pode ser convertido em energia elétrica por acionamento de um alternador. A expansão realiza-se até pressões muito baixas (alguns milibares) a que correspondem temperaturas de saturação inferiores a 40°C. O vapor à saída da turbina é condensado no condensador que é mantido a uma pressão inferior à atmosférica com recurso a bombas de vácuo e arrefecido por um circuito de água que permuta calor com a fonte fria (e.g. mar, rio, atmosfera). O condensado assim obtido é bombeado através da bomba de alimentação da caldeira, reiniciando-se o ciclo.

A figura 1 ilustra o esquema de princípio subjacente ao ciclo de Rankine, mostrando-se na figura 2 o ciclo termodinâmico teórico num diagrama temperatura - entropia.

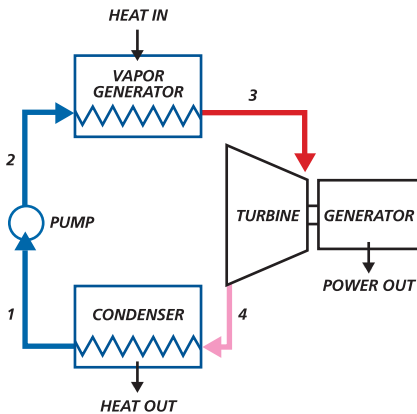


FIGURA 1:
Ciclo de Rankine (esquema de princípio)

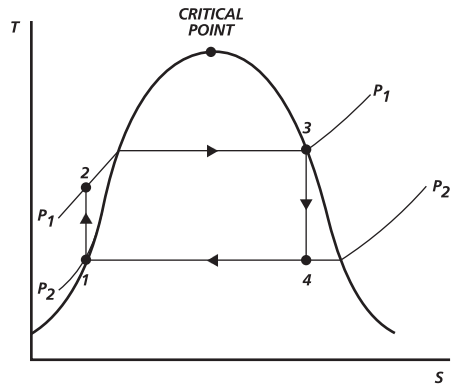


FIGURA 2:
Diagrama Temperatura-Entropia (T-s)

A entropia é uma grandeza termodinâmica que traduz as irreversibilidades de um qualquer processo termodinâmico. Num ciclo de Rankine ideal a expansão do vapor seria realizada a entropia constante entre a pressão de vapor na admissão da turbina e a pressão de condensação. Esta situação corresponde ao trabalho máximo teórico que é possível extrair do fluido de trabalho (neste caso vapor de água) entre as condições de pressão e temperatura à entrada e saída da turbina de vapor. No entanto como existem perdas de calor (o processo não é adiabático) e ocorrem irreversibilidades na expansão do vapor no interior da turbina (ou seja o rendimento isentrópico de cada andar da turbina não é unitário) significa que a expansão de vapor não se realiza a entropia constante (ver figura 3).

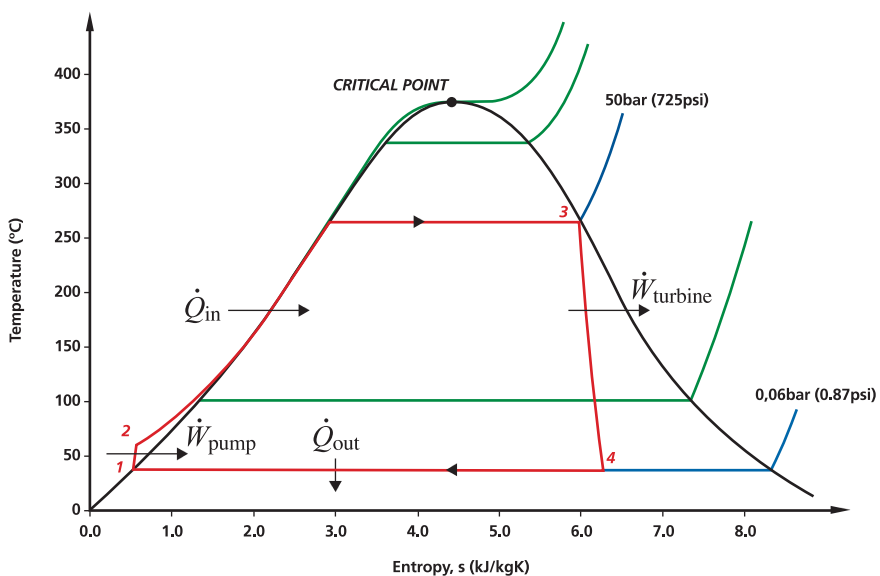


FIGURA 3: Diagrama Temperatura-Entropia de um ciclo de Rankine real

O trabalho realizado num ciclo de Rankine pode ser aumentado recorrendo à expansão do vapor a diferentes níveis de pressão com posterior reaquecimento e sobreaquecimento (ver figura 4). Na prática corresponde a um aumento da área do ciclo representado que é proporcional ao trabalho realizado, aumentando-se desta forma o rendimento termodinâmico do mesmo:

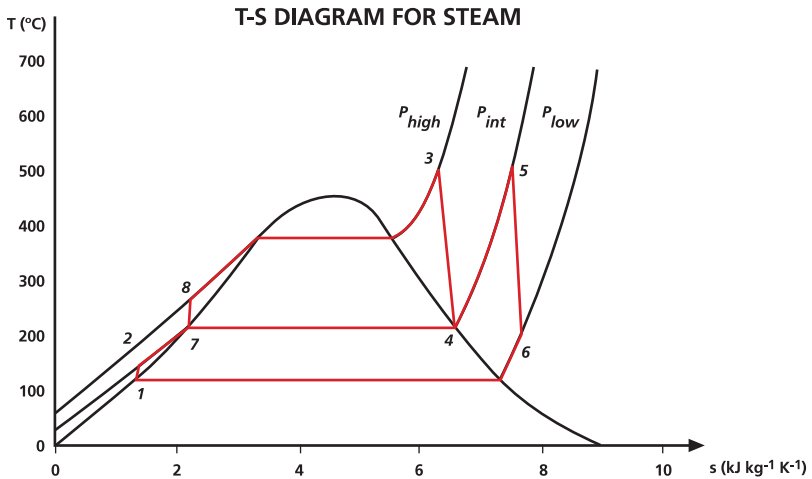


FIGURA 4: Diagrama Temperatura-Entropia de um ciclo de Rankine com reaquecimentos e sobreaquecimento (fonte: Wikipedia)

No caso de um Ciclo Orgânico de Rankine (COR) ou na designação anglo-saxónica *Organic Rankine Cycle (ORC)*, a grande diferença em relação a um ciclo de Rankine convencional reside no fluido de trabalho. Enquanto num ciclo de Rankine convencional como o que foi descrito sumariamente, o fluido de trabalho é água na fase líquida e de vapor, no caso dos Ciclos Orgânicos de Rankine (COR) são utilizados fluidos orgânicos (incluem compostos de carbono) com uma massa molecular mais elevada do que a água. Para pequenas potências elétricas (e.g. até 10 MW) os COR apresentam melhores desempenhos que no caso de um CR convencional. A figura 5 ilustra o princípio subjacente a um Ciclo Orgânico de Rankine.

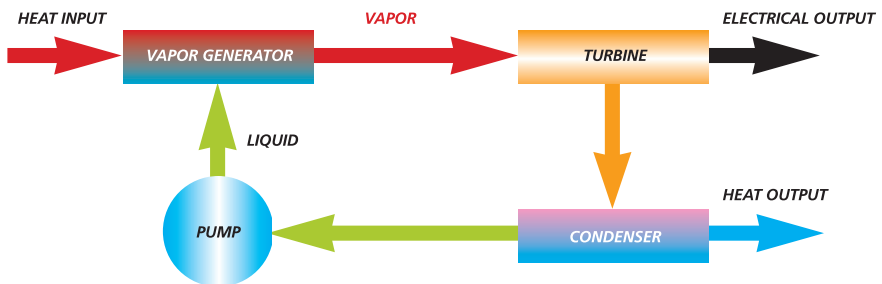


FIGURA 5: Diagrama de princípio de um Ciclo Orgânico de Rankine (fonte: Honeywell)

Num Ciclo Orgânico de Rankine é usual utilizar fluidos cuja linha de saturação à pressão atmosférica ocorre a uma temperatura mais baixa do que no caso da água o que permite, nomeadamente, a recuperação de calor a mais baixa temperatura. Esta tecnologia permite assim a recuperação de calor de fontes tais como:

- Geotermia;
- Combustão de biomassa;
- Efluentes térmicos industriais (incluindo efluentes térmicos de motores);
- Etc.

2. VANTAGENS DOS CICLOS ORGÂNICOS DE RANKINE

Num ciclo de Rankine convencional os rotores das turbinas de vapor giram a velocidades elevadas e os andares de baixa pressão podem sofrer erosão no caso de ocorrer condensação de vapor antes do condensador. É fácil entender que pequenas gotas de água com muito maior densidade que o vapor animadas de uma elevada energia cinética podem ter consequências graves para a integridade das pás de uma turbina de vapor. Esta é uma das razões da utilização de vapor sobreaquecido à entrada de uma turbina para que durante a sua expansão, no interior da máquina, se minimize o risco de ocorrência de condensação (ver figuras 3 e 4).

Uma turbina que opere segundo um COR funciona a um regime de rotação e pressão mais baixo com ausência de erosão de componentes metálicos, incluindo as pás de turbina. Pelo facto do fluido de trabalho possuir uma massa molecular mais elevada permite maiores caudais mássicos e, conseqüentemente, uma maior potência debitada para o mesmo caudal volúmico (a potência desenvolvida por uma turbina é proporcional ao caudal mássico do fluido de trabalho que a atravessa).

Podem-se resumir assim as vantagens de um grupo gerador que opere segundo um COR:

- Elevado rendimento do ciclo termodinâmico;
- Rendimento muito elevado da turbina ($\approx 90\%$);
- Baixa solicitação mecânica da turbina devido a uma baixa velocidade periférica do rotor;
- Baixa rotação da turbina o que permite o acionamento direto do alternador sem recurso a caixas de redução de velocidade;
- Inexistência de erosão nas pás por ausência de condensação no interior da máquina.

4. CICLOS ORGÂNICOS DE RANKINE

3. DESCRIÇÃO DA TECNOLOGIA

Existem diversos fabricantes que disponibilizam tecnologia com base em ciclos orgânicos de Rankine dos quais se destacam os seguintes:

- | | |
|--------------|--------------------|
| 1. Turboden | 6. GMK |
| 2. ORMAT | 7. Koehler-Ziegler |
| 3. OPCON | 8. UTC |
| 4. Tri-O-Gen | 9. Cryostar |
| 5. Adoratec | 10. Freepower |

As diferenças residem muitas das vezes no tipo de fluido utilizado no ciclo e na forma como é fornecido o calor ao equipamento. A empresa Turboden, por exemplo, utiliza um óleo térmico para transportar o calor da fonte quente às unidades que operam segundo um ciclo orgânico de Rankine.

O esquema seguinte (figura 6) ilustra o diagrama de princípio de uma tecnologia COR típica e a correspondente evolução num diagrama T-s.

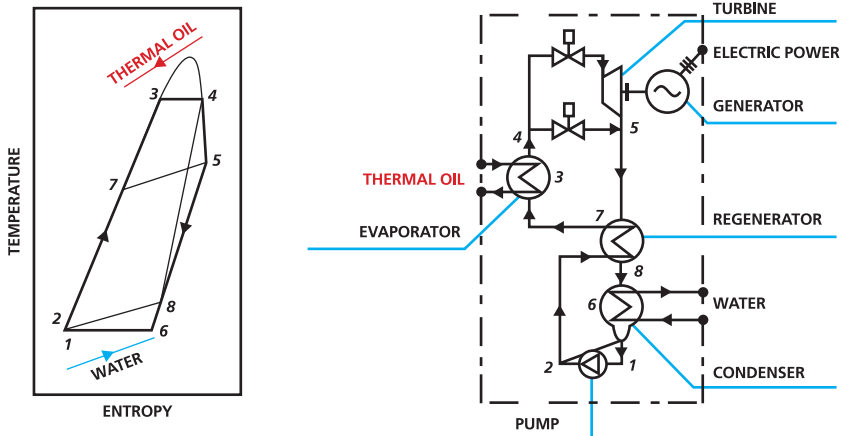


FIGURA 6: Esquema de princípio de tecnologia com base em ciclo orgânico de Rankine (fonte: Turboden)

O turbo gerador utiliza o óleo térmico a temperatura elevada para pré-aquecer e vaporizar um fluido orgânico adequado no evaporador (7, 3, 4). O vapor do fluido orgânico aciona a turbina que se encontra acoplada ao alternador. O vapor à saída da turbina atravessa um regenerador (5, 8) onde aquece o líquido orgânico (2, 7). O vapor é então condensado no condensador (arrefecido pelo escoamento de água – 8, 6, 1). O líquido orgânico é finalmente bombeado (1, 2) ao regenerador e depois ao evaporador, completando desta forma a sequência de etapas neste circuito fechado.

O equipamento, propriamente dito, é ilustrado na figura 7.



FIGURA 7: Tecnologia COR (fonte: Turboden)

4. FLUIDOS ORGÂNICOS UTILIZADOS EM COR

Um fator importante que afeta o rendimento de um Ciclo Orgânico de Rankine (COR) é o fluido utilizado. Um fluido de trabalho adequado a um COR deverá possuir as seguintes características:

- Baixa toxicidade;
- Boa estabilidade;
- Compatibilidade com o material da tubagem e equipamento de expansão utilizado;
- Pouco inflamável;
- Pouco corrosivo;
- Não causar incrustações (*fouling*).

Os fluidos orgânicos podem ser classificados como secos, húmidos e isentrópicos, função do declive da sua curva de saturação num diagrama T-s (temperatura - entropia) como ilustrado na figura 8.

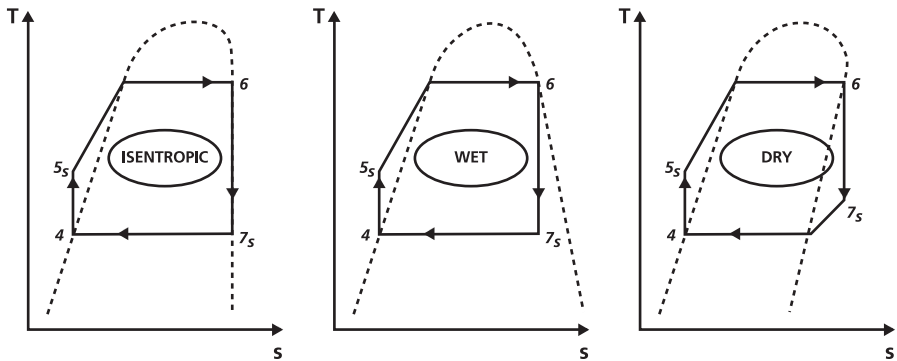


FIGURA 8: Representação esquemática de fluidos isentrópicos, húmidos e secos (fonte: 1)

Os fluidos orgânicos considerados secos e isentrópicos não condensam após expansão numa turbina, contrariamente ao que acontece com os fluidos designados por húmidos. Desta forma, os primeiros são mais adequados a aplicações com base em COR quando não é possível proceder a um sobreaquecimento do fluido.

Muitos dos fluidos refrigerantes utilizados na indústria de frio podem ser utilizados em Ciclos Orgânicos de Rankine, fluidos tais como o R-134a, designação comercial para o tetra-flúor-etano ($\text{CF}_3\text{CH}_2\text{F}$) e que não afeta a camada de ozono, sendo o principal substituto do R-12 em sistemas de ar condicionado no setor automóvel e sistemas de refrigeração em todos os setores.

Outro fluido com aplicação em COR é o penta-flúor-propano ($\text{CF}_3\text{CH}_2\text{CHF}_2$), designado comercialmente por R-245fa. Este fluido, ao contrário de outros refrigerantes utilizados em COR (e.g. hidrocarbonetos) caracteriza-se por ter uma baixa toxicidade e não ser inflamável. Este facto

¹ "Exhaust Waste Heat Recovery from Stationary Engines Using Organic Rankine Cycles"
P. Mago et al., 2010

permite uma maior penetração deste refrigerante quando comparado com outros sistemas que incluem fluidos inflamáveis, assim como uma maior aceitação e implementação de COR em diversas aplicações e ambientes de utilização final.

Apresenta-se na figura 9 o diagrama p-h (pressão-entalpia), também designado por diagrama de Mollier, para o refrigerante R-245fa.

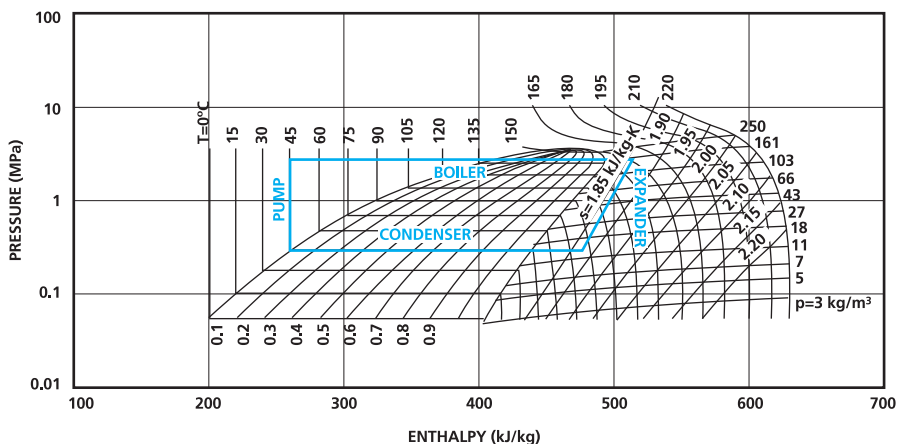


FIGURA 9: Diagrama p-h para o R-245fa (fonte: Honeywell)

A linha a azul representa a evolução termodinâmica de um Ciclo Orgânico de Rankine nas seguintes condições:

- Rendimento da bomba - 75%
- Rendimento da turbina - 85%
- Temperatura à saída da caldeira (evaporador) - 150 °C
- Temperatura de condensação - 45 °C
- Pressão na caldeira - 2,758 MPa (27,58 bar)

O R-245fa é particularmente bem adaptado ao aproveitamento de calor a baixa temperatura, tipicamente entre 60 e 300 °C, sendo as suas propriedades termodinâmicas distintas de outros HFCs utilizados em refrigeração. Em termos económicos, um melhor rendimento do ciclo termodinâmico quando comparado com soluções alternativas permite um aumento da energia produzida, reduzindo o período de retorno do investimento. O R-245fa devido às suas propriedades

termodinâmicas permite uma redução da dimensão do sistema com base em COR o que implica menor custo de investimento para o utilizador final. O facto do fluido refrigerante não ser inflamável conduz a uma redução substancial do investimento quando comparado com soluções alternativas em que seja necessário considerar medidas de segurança adicionais, seguros, ATEX - Atmosferas Explosivas, etc.

Com base nos diversos fluidos orgânicos disponíveis no mercado podem ser desenvolvidas ferramentas de otimização de sistemas baseados em COR como a que se ilustra, esquematicamente, na figura 10.

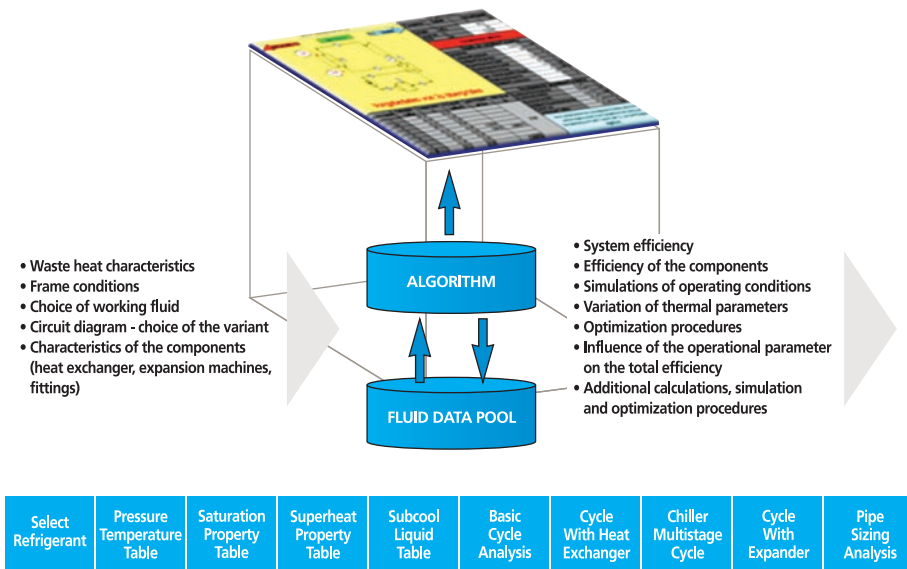


FIGURA 10: Esquema de programa de otimização de sistemas com base em COR (fonte: 2)

² Analysis of Organic Rankine Cycle as Application for Waste Heat Utilisation in Cogeneration Units with Combustion Engines, S. Smolen, 2010

5. EQUIPAMENTO DE EXPANSÃO ³

O desempenho dos sistemas baseados em COR está intimamente ligado ao equipamento que produz a expansão do vapor do fluido orgânico. Utilizam-se, essencialmente, máquinas de dois tipos:

- Reação;
- Deslocamento positivo (*positive displacement*).

No primeiro caso são utilizadas turbinas (centrífugas ou axiais) e no segundo máquinas de parafuso, *scroll* ou alternativas que são mais adequadas a potências mais pequenas, caracterizando-se por movimentar menores caudais, exibir razões de pressão mais elevadas e velocidades de rotação mais baixas.

As máquinas de expansão de parafuso com utilização em ciclos orgânicos de Rankine são constituídas por dois parafusos helicoidais que engrenam entre si e estão contidos dentro de uma carcaça com tolerâncias bastante reduzidas da ordem dos 0,05 mm (ver figura 11).

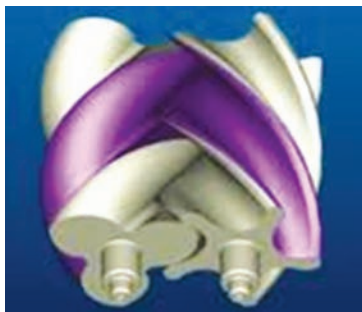


FIGURA 11: Compressor / expansor Lysholm (fonte: Autozine)

Os parafusos rodam sob a ação do fluido orgânico, na fase de vapor, que preenche o volume livre entre os rotores e a carcaça, transformando energia de pressão em trabalho mecânico ao

³ *Technological and Economical Survey of Organic Rankine Cycle Systems*
Sylvain Quoilin and Vincent Lemort, 2009

veio. À medida que a pressão do fluido diminui o seu volume específico aumenta (i.e. a sua densidade diminui) e a velocidade aumenta. Ao contrário das turbinas centrífugas ou axiais o efeito dinâmico do escoamento do fluido tem um peso reduzido na transferência de energia em máquinas de expansão de parafuso. A presença de líquido juntamente com o vapor a ser expandido tem um efeito reduzido no seu modo de funcionamento ou rendimento.

Os requisitos fundamentais para um funcionamento eficiente deste tipo de máquinas são os seguintes:

- Máxima área de escoamento no espaço formado entre os lobos dos parafusos e a carcaça;
- Fugas mínimas de fluido através das folgas existentes na máquina;
- Escolha adequada da razão de expansão volumétrica;
- Escolha adequada da velocidade periférica de rotação.

Como as máquinas de expansão do tipo parafuso são caracterizadas por uma razão volumétrica fixa, de forma a otimizar o seu desempenho, esta razão deverá corresponder às condições de funcionamento para limitar as perdas decorrentes de uma sub-expansão ou de uma sobre-expansão. Como as taxas de expansão volumétrica típicas dos ciclos de Rankine são superiores às que se verificam nos sistemas de refrigeração com base em ciclos de compressão de vapor, justifica-se o projeto de novos expansores em vez de soluções adaptadas, nomeadamente, da indústria de refrigeração.

6. RECUPERAÇÃO DE CALOR EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Quando se refere nesta brochura um motor de combustão interna, entende-se um motor alternativo que opera quer segundo um ciclo Otto quer segundo um ciclo Diesel. Apesar de não o considerarmos neste documento, uma turbina de gás pode também ser entendida como um “motor de combustão interna” pelo facto de produzir trabalho mecânico e queimar, internamente na(s) sua(s) câmara(s) de combustão, um combustível de origem fóssil ou outro.

O rendimento de um motor de combustão interna poderá ser inferior a 30% no caso de motores de pequena cilindrada para tração automóvel até mais de 45% no caso de motores industriais de grande dimensão. Esta afirmação permite mostrar que mesmo no caso dos motores de maior rendimento se pode perder mais de 50% da energia contida no combustível em calor que será cedido à fonte fria sem qualquer utilidade prática quando o objetivo é apenas a produção de energia mecânica (ou elétrica).

Claro está que os sistemas de cogeração conferem um muito melhor aproveitamento energético do combustível (ver a este respeito ¹ e ²) mas nem sempre estes sistemas permitem, por imposição do processo industrial (ou outro), aproveitar o calor a muito baixa temperatura. Adicionalmente poderá a procura de calor não ser constante ao longo do ano, podendo ser interessante aumentar a produção de energia elétrica (energia mais valorizada) em períodos de redução da procura de calor. É precisamente neste aspeto particular que a utilização de tecnologia com base num Ciclo Orgânico de Rankine se pode perfilar como bastante interessante.

A figura 12 ilustra, esquematicamente, as perdas de calor decorrentes do funcionamento de um motor alternativo de grande dimensão. Verifica-se que o calor a baixa temperatura decorrente do sistema de refrigeração do motor representa uma percentagem importante da energia primária fornecida. Na indústria automóvel não é inédita a proposta de utilização do calor do motor para produção adicional de energia elétrica aumentando o rendimento do motor térmico.

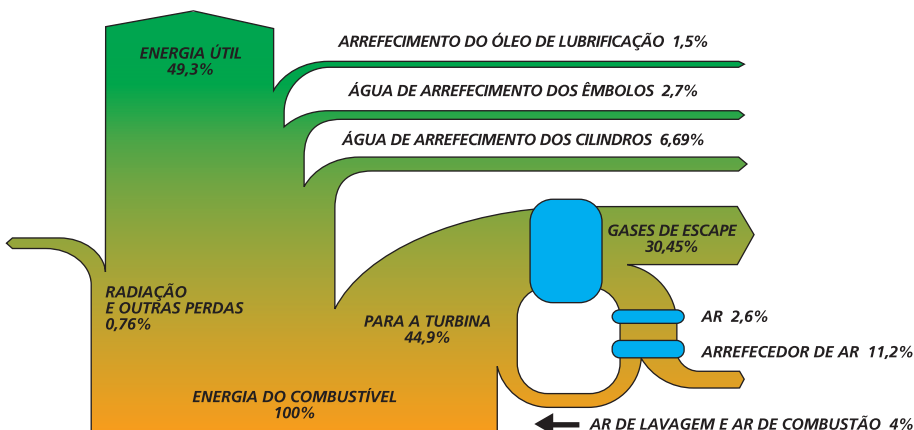


FIGURA 12: Diagrama de Sankey para motor Diesel de grande dimensão
(fonte: www.sankey-diagrams.com)

Ensaaios com um interesse mais significativo para o setor industrial com motores de maior dimensão têm ocorrido no setor naval em que se pretende aumentar o rendimento de um motor Diesel e baixar as suas emissões com recurso a tecnologia com base em COR ⁴. O aproveitamento

⁴ Diesel & Gas Turbine Worldwide, Maio 2011

de calor é realizado a temperaturas tão baixas da ordem dos 55°C, integrando tecnologia COR desenvolvida pela OPCON num motor Diesel naval a 2 tempos (MAN B&W 8S60ME-C8) que equipa um navio atualmente em construção.

A OPCON oferece tecnologia COR totalmente contentorizada (*OPCON Powerbox*®) que permite a redução, entre 5 e 10 pontos percentuais, do consumo de motores de combustão interna industriais ou, alternativamente, aumentar a potência elétrica do mesmo montante sem ter de se recorrer a motores maiores ou mais combustível. Esta tecnologia permite o aproveitamento do calor a baixa temperatura, tal como o que resulta do circuito de arrefecimento dos cilindros do motor e do arrefecimento do ar de lavagem e mistura combustível em motores Diesel e Otto, transformando-o de forma eficiente em energia elétrica. Concomitantemente consegue-se uma diminuição das emissões, nomeadamente CO₂, NO_x e SO_x. Esta tecnologia como foi desenvolvida para aplicações de baixa temperatura pode ser associada a motores de menor dimensão. O rendimento teórico deste tipo de aproveitamento depende da diferença de temperaturas entre a fonte quente e a fonte fria.

A tecnologia desenvolvida pela OPCON utiliza uma turbina Lysholm como a que se apresenta na figura 11. A Powerbox desenvolvida pela OPCON permite a produção de energia elétrica com potências da ordem dos 740 kW a partir de efluentes térmicos (e.g. água quente) com temperaturas compreendidas entre 55 e 140°C.

A figura 13 ilustra uma instalação típica destinada à produção suplementar de energia elétrica a partir de energia térmica rejeitada.



FIGURA 13: Aproveitamento de efluentes térmicos com a Powerbox (fonte: OPCON)

7. ASPETOS ECONÓMICOS DA RECUPERAÇÃO DE CALOR COM COR – CICLOS ORGÂNICOS DE RANKINE

Em relação a outros sistemas de produção de energia, as centrais de recuperação de calor com ciclos orgânicos de Rankine têm a vantagem de evitar os custos de aquisição de combustível. A partir do momento em que os custos totais de investimento e os custos de operação e manutenção são estimados com base na potência da central, os resultados operacionais podem ser calculados com base na redução da fatura energética, nomeadamente com a redução do custo de aquisição de energia elétrica à rede.

A estimativa do custo total de investimento da central de recuperação de calor e a sua integração com a instalação existente, seja ela um motor de combustão interna ou um processo industrial mais complexo que permita a valorização energética de calor residual, poderá constituir um desafio devido a diversos constrangimentos (e.g. *layout* das instalações).

Entre os componentes que desempenham um papel chave no sistema de recuperação de calor incluem-se o módulo COR e o permutador de recuperação de calor.

O custo e o desempenho do módulo de recuperação de calor depende de vários fatores, nomeadamente:

- Energia térmica disponível;
- Temperatura e tipo do vetor energético utilizado (água, óleo térmico, vapor, etc.);
- Temperatura e tipo da fonte fria (ar ou água);
- Fluido de trabalho;
- Aspectos particulares do ciclo termodinâmico, etc.

O custo dos permutadores de calor está intimamente relacionado com as propriedades dos gases de exaustão - temperatura, teor de partículas, presença de poluentes agressivos – que influenciam a superfície de permuta, seleção do material a utilizar, geometria e, conseqüentemente, custo final do equipamento. O efeito de escala é também importante porque instalações de maior dimensão serão mais económicas, resultando num custo específico (€/kW) mais baixo.

A tabela 1 apresenta um estudo comparativo entre três projetos de recuperação de calor com tecnologia baseada em COR para três subsectores industriais (cimento, vidro e siderúrgico), onde os custos de investimento, energia elétrica produzida e resultados financeiros são apresentados.

INDÚSTRIA / APLICAÇÃO	CIMENTEIRA	VIDREIRA	SIDERÚRGICA	UNIDADE
			Planos (laminagem)	
Fonte de calor	Gás de arrefecimento do forno de clinker	Gás de exaustão do forno de vidro	Gás de exaustão do forno de pré-aquecimento	
Capacidade fabril	2 500	500	6 000	t / dia
Custo de eletricidade	0,09	0,095	0,06	€/kWh
Potência térmica desperdiçada nos gases de exaustão (gases arrefecidos a 150-160°C)	12	5	13	MW _t
Potência térmica aproveitada no COR	11	4,7	13	MW _t
Potência térmica fornecida aos utilizadores	1	0,3	0	MW _t
Potência elétrica líquida do COR	1,6	1	2,4	MW _{el}
Energia elétrica produzida anualmente (8000 h)	12 800	8 000	19 200	MWh/ano
INVESTIMENTO				
Custo da unidade COR	1,8	1,3	2,4	M€
BOP – <i>Balance of Plant</i>	2,6	1,1	1,5	M€
Custo total (+10% de gestão de projeto)	4,8	2,6	4,3	M€
CASHFLOW ANUAL				
Custos operacionais	-40 000	-40 000	-40 000	€/ano
Cashflow - eletricidade	1 152 000	760 000	1 152 000	€/ano
Cashflow – calor (0,03€/kWh)	240 000	72 000	0	€/ano
Cashflow líquido	1 352 000	792 000	1 112 000	€/ano
RESULTADOS				
Proveitos antes de impostos	-	-	-	-
TIR (10 anos)	25%	27%	23%	-
VAL (10 anos)	5 333 129	3 310 109	4 091 971	€
CO ₂ evitado	9 664	5 520	12 096	t/ano

TABELA 1: Projetos de recuperação de calor com COR (fonte: 5)

5 "ORC Recovering Industrial Heat – Power Generation from Waste Energy Streams", R. Vescovo, 2009

8. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DE TECNOLOGIA COM BASE EM CICLOS ORGÂNICOS DE RANKINE (COR)

8.1. GEOTERMIA

CENTRAIS GEOTÉRMICAS DA RIBEIRA GRANDE E PICO VERMELHO (S. MIGUEL – AÇORES)



FIGURA 14: Central geotérmica da Ribeira Grande (fonte: SOGEO)

A central geotérmica da Ribeira Grande tem uma potência de 13 MW, tendo sido instalada em duas fases:

- Fase A (1994) - 2 grupos turbogeradores (2 x 2,5 MW);
- Fase B (1998) - 2 grupos turbogeradores (2 x 4 MW).

Esta central utiliza tecnologia binária com base em COR, recorrendo a um fluido intermédio (n-pentano) que é aquecido pelo vapor e água geotérmicos. A figura 15 ilustra o princípio de funcionamento.

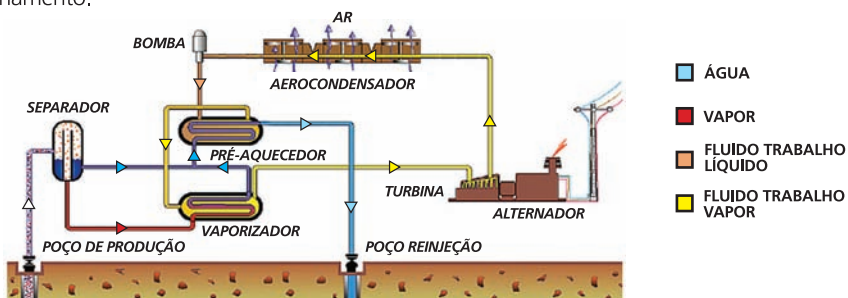


FIGURA 15: Princípio de funcionamento de tecnologia binária com base em COR (fonte: SIARAM)

Estão associados a esta central cinco poços de produção e um poço de injeção. O geofluido após permuta de calor no vaporizador é conduzido para o poço de injeção onde é injetado na totalidade. A central arrancou em Março de 1994, desde esta data tem-se registado um decréscimo de pro-

dução típica do declínio natural dos poços geotérmicos face à exploração, situação que requer a abertura de poços de produção adicionais.

A outra central geotérmica da ilha de S. Miguel (Pico Vermelho) teve um papel experimental aquando do seu arranque (1980), tendo posteriormente sofrido uma remodelação (2006) com aumento de potência que atinge, atualmente, 10MW. Esta central é abastecida por cinco poços de produção com profundidades médias de 1000 m e temperaturas máximas da ordem de 240°C. Esta central produziu 98,5 GWh e, conjuntamente com a produção da central da Ribeira Grande assegurou 41% da produção total de energia elétrica na ilha. A figura 16 ilustra a evolução da produção conjunta das duas centrais.

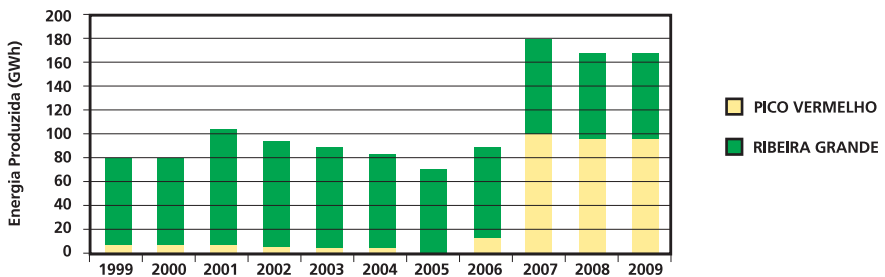


FIGURA 16 Produção conjunta das centrais geotérmicas de Pico Vermelho e Ribeira Grande (fonte: SOGEO)

As principais características da central geotérmica da Ribeira Grande estão detalhadas na tabela 2.

CENTRAL DA RIBEIRA GRANDE	ESPECIFICAÇÕES
Tecnologia	Ciclo binário
Fluido de trabalho	n-Pentano
Pressão entrada turbina	13 barg
Contrapressão	0,1 barg
Potência elétrica (grupos 1 e 2)	2 x 2,54 MW
Potência elétrica (grupos 3 e 4)	2 x 4,70 MW
Potência total instalada	14,48 MW
Fabricante turbinas	ORMAT
Ano de arranque da instalação (grupos 1 e 2)	1994
Ano de arranque da instalação (grupos 3 e 4)	1998
CONDIÇÕES DE FUNCIONAMENTO	
Número de horas de funcionamento anual	N.A.
Energia elétrica produzida anualmente (média)	80 000 MWh

TABELA 2: Características da central geotérmica da Ribeira Grande

8.2. BIOMASSA

Na indústria de produção de placas de fibra de madeira de média densidade (MDF - *Medium Density Fiberboard*) as necessidades de calor são muitas vezes garantidas por grandes caldeiras de biomassa que reutilizam matéria-prima rejeitada como combustível. O calor é utilizado sob a forma de óleo térmico nas prensas e como gases quentes da combustão no processo de secagem das fibras de madeira. O processo de fabrico de MDF requer, também, um consumo elevado de energia elétrica, nomeadamente no processo de estilhagem e refinação da madeira o que torna a aplicação dos esquemas de cogeração particularmente atrativos.

A utilização de esquemas de cogeração tradicionais com produção de vapor de alta pressão para utilização em turbinas de contrapressão e condensação, complica substancialmente o processo. Cumulativamente para centrais de cogeração com uma dimensão que as torne economicamente competitivas (e.g. $P > 5 \text{ MWel}$) resulta num desperdício de calor que não pode ser completamente utilizado no processo.

A utilização de um Ciclo Orgânico de Rankine como o que é apresentado, esquematicamente na figura 17 pode fazer sentido nestas situações com a inclusão do seguinte equipamento:

- Utilização de uma caldeira de óleo térmico adicional colocada em paralelo com a caldeira de óleo térmico existente, permitindo um *by-pass* dos gases de combustão para a câmara de mistura;
- Uma unidade com base num COR;
- Um permutador de calor destinado ao pré-aquecimento do ar fornecido à câmara de mistura.

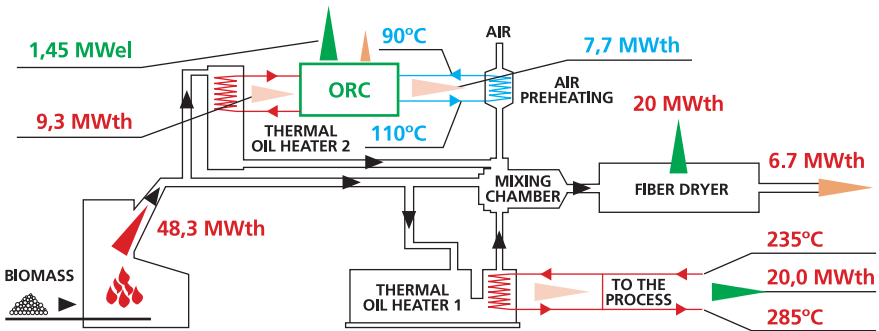


FIGURA 17: Esquema proposto para a unidade de produção de painéis MDF em Metso (fonte: Turboden)

Em relação à situação base do processo industrial (i.e. 20 MW_t para secagem e 20 MW_t para outros equipamentos de processo) é possível transferir, com a solução proposta, cerca de 7,7 MW_t para o pré-aquecimento do ar exterior antes de este atingir a câmara de mistura. Adicionalmente, assumindo temperaturas de ida e retorno do óleo térmico de 300 - 250°C no equipamento com base em COR é possível produzir 1,45 MWe em cogeração.

8.3. EFLUENTES TÉRMICOS INDUSTRIAIS

OXON ITALIA SPA, (PAVIA – ITÁLIA)



FIGURA 18: Grupo motor alternador de uma central de cogeração (fonte: MAN)

A empresa OXON (Indústria Química) instalou, em colaboração com a *Termodindustriale*, um sistema de cogeração que permite o aproveitamento do calor dos gases de escape de um motor Diesel MAN 18V 32/40 de 8,3 MWe_{el} alimentado a biodiesel. O sistema prevê a utilização de um circuito intermédio de óleo térmico que realiza a permuta de calor dos gases de escape do motor para um sistema com base num COR manufacturado pela *Turboden*. O calor de condensação é dissipado através de um circuito de água com uma torre de refrigeração evaporativa.

O fluido orgânico de trabalho utilizado é um siloxano (fluido do tipo silicone). O sistema permite obter uma potência elétrica adicional de 0,5 MWe_{el} e encontra-se em funcionamento desde 2008.

8.4. GÁS DE ATERRO SANITÁRIO

ADP – ÁGUAS DE PORTUGAL, (SERMONDE, PORTUGAL)



FIGURA 19: Central termoe elétrica do aterro sanitário de Sermonde
(fonte: Tri-O-Gen / Sotecnisol)

Este projeto, recentemente inaugurado em Portugal, aproveita o gás de aterro sanitário de Sermonde (Vila Nova de Gaia) para queima direta em motores a biogás (Jenbacher 320) com uma potência unitária de 1065 kW. As unidades de ORC da marca Tri-O-Gen aproveitam o calor dos gases de escape dos motores o que permite uma capacidade instalada adicional de 2 x 150 kWe.

Os equipamentos de ORC permitem aproveitar o calor dos gases de escape dos grupos eletrogéneos que de outra forma seriam desperdiçados. Esta tecnologia inovadora foi instalada pela Sotecnisol e Tri-O-Gen no aterro gerido pela Suldouro.

A central de valorização energética da Suldouro produz eletricidade a partir do biogás resultante da decomposição da matéria orgânica proveniente do aterro. Apenas 40% da energia química do biogás é transformada em energia elétrica nos grupos geradores, registando-se perdas importantes nos gases de escape (cerca de 35%) e no circuito de arrefecimento de água dos motores. Identificou-se um potencial de recuperação energética importante nos gases de escape que atingem temperaturas da ordem dos 450 °C o que motivou a instalação de dois equipamentos baseados em ORC que permitem aumentar em cerca de 7% a produção de energia elétrica.

Um dos problemas que ocorre com o aproveitamento dos gases de aterro sanitário prende-se com a queima de gás sulfídrico (H₂S) que origina óxidos de enxofre nos gases de escape. Estes óxidos de enxofre constituem um contaminante no evaporador do ciclo orgânico de Rankine.

9. REFERÊNCIAS

P. J. Mago et al.

Exhaust Waste Heat Recovery From Stationary Engines Using Organic Rankine Cycles

<http://engineeringcases.knovelblogs.com> - Março, 2010

S. Smolen

Analysis of Organic Rankine Cycle as Application for Waste Heat Utilisation in Cogeneration Units with Combustion Engines

2010

Sylvain Quoilin, et al.

Technological and Economical Survey of Organic Rankine Cycle Systems” - 5th European Conference - Economics and Management of Energy in Industry

14-17 Abril, Vilamoura, Portugal

ORC Makes Waves in Marine

MAN Diesel & Turbo and OPCON to integrate ORC Technology in marine applications

Diesel & Gas Turbine Worldwide, Maio 2011

Riccardo Vescovo

ORC Recovering Industrial Heat - Power Generation from waste energy streams

COSSP - Cogeneration an On-Site Power Production, March-April 2009

Honeywell

Genetron® 245 fa - Working Fluid for ORC Systems - Low Temperature Heat Recovery with Genetron 245 FA

Roberto Bini, et al.

Organic Rankine Cycle (ORC) in Biomass Plants: An overview on different applications

Turboden - www.turboden.it

Carlos Bicudo

Energia Geotérmica

<http://siaram.azores.gov.pt> - Setembro 2010

MAN Diesel Press Release

Organic Rankine Cycle

18 Julho 2008

Águas de Portugal

Suldouro e AdP Energias instalam tecnologia inovadora

www.adp.pt - Dezembro 2011

Landfill Site Suldouro Portugal - www.triogen.nl

www.wikipedia.org

www.sankey-diagrams.com

www.autozine.org



ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA PARA A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E PROMOÇÃO DA COGERAÇÃO

Rua de Salazares, 842 • 4149-002 Porto
Tel. +351 226 153 310 • Fax +351 226 153 319
cogen.portugal@cogenportugal.com
www.cogenportugal.com

Esta brochura foi escrita segundo o novo acordo ortográfico.



C O G E N
P O R T U G A L

ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA
PARA A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
E PROMOÇÃO DA COGERAÇÃO

www.cogenportugal.com